

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 19820091152546

UDC _____

厦门大学

硕 士 学 位 论 文

植入式微纳器件的无线能量传输的研究

The Study on Wireless Power Delivery for Implanted Devices

夏 瑞

指导教师姓名: 郭航 教授

专 业 名 称: 微电子学与固体电子学

论文提交日期: 2012 年 5 月

论文答辩时间: 2012 年 月

学位授予日期: 2012 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2012 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

近年来,随着 MEMS 技术的发展,越来越多的用于人体的或生物的可植入微纳器件被研发出来,但其供能问题始终是一个瓶颈。如何解决植入式器件供能问题正在被广泛研究。本文设计了一种以腰部缠绕式线圈作为发射器,以 PCB 电感和 MEMS 电感作为接收器的无线能量传输方案,可以实现为人体内多个较低能耗植入式器件同时充电的功能。

首先,本文通过分析比较三种可运用于计算无线能量传输效率的理论,讨论了它们各自的适用条件,最终选择了较为适合的松耦合理论并借助电磁仿真软件对传输效率进行了分析计算。为了优化传输效率,分析了发射和接收线圈的物理模型,并对其电阻与两线圈间的互感进行了详细讨论。

接着,结合上面的理论分析,对发射与接收线圈进行了优化设计、制造与测试。运用单芯铜线制作了发射线圈,且详细介绍了被用作接收线圈的 MEMS 平面电感的厚膜电镀制造工艺及 PCB 电感的印刷电路板制作工艺。然后,运用阻抗分析仪对其电感值和 Q 值进行了测试,表明所设计的 MEMS 电感在 40.68MHz 时有 1 μ H 左右的电感值,得到的 Q 值为 2 左右。

再者,详细讨论了人体这种有损色散介质的各个介电特性参量对电磁波传输的影响。研究表明在 40.68MHz 的工作频率下,磁场强度在人体中会比空气中有所加强。并仿真计算了所设计中的人体 SAR 最大值,其结果远小于 1 克人体组织吸收电磁能量不超过 1.6 的 FCC 标准。

最后,在空气和生理盐水中,分别对不同的传输频率、接收天线面积、两线圈相对位置对能量传输效率的影响进行了测试和分析,并讨论了端口匹配效率的影响。表明在 40.68MHz 时测试得到的传输效率在生理盐水中有所提高,而且传输效率主要受发射线圈电磁场分布、接收线圈面积的影响,而端口匹配效率对其影响并不大。然后讨论了常用的三种生物兼容性封装方法,并对所采用的 PDMS 封装方法进行了稳定性测试。

关键词: 可植入式器件; 无线能量传输; MEMS; 电感线圈; 封装技术

Abstract

With the development of MEMS technology, more and more micro/nano implantable devices are developed. They aim to the implantable application of human body or organism, but the power supply could be a bottle-neck which has been widely researching now. We develop a new method of RF power delivery using a spiral coil wrapped round one's waist as transmitter and implanted MEMS and PCB coils as receiver, respectively, and a number of implanted low power consumption microdevices can be simultaneously powered.

Firstly, the applicable scopes of three theories are discussed and the poorly-coupled theory is chosen to calculate the wireless power transmission efficiency with help of the electromagnetic simulation software. The physical model of the transmitting and receiving coil is established and the resistance and mutual inductance are discussed in detail to optimize the transmission efficiency.

Then, the transmitting and receiving coil is optimally designed, fabricated and tested based on the previous theoretical study. The transmitting coil is made of single-core wire and receiver coils are made of MEMS and PCB inductances. The fabrication process of MEMS planar inductance, especially the thick-film electroplating is discussed and the preparation technology of printed circuit board is introduced as well. The coils are tested using impedance analyzer and the results indicate that the MEMS planar inductance's inductance value is about $1\mu\text{H}$ and its Q value is around 2 at 40.68MHz.

Furthermore, the influences of the dielectric characteristics parameters of human body, which is a lossy dispersive media, to electromagnetic transmission are discussed. It shows that the intensity of the magnetic field is strengthened in human body compared with the value in air. In our design, the maximum value of the human body's SAR is 0.06 W / kg simulated by the electromagnetic simulation software, which is far more less than the limitation of 1.6W/kg over a volume of 1g which is

established by the FCC for the United States.

Finally, the influences of transmission frequency, the area of receiver coil and the relative position of transmitter and receiver to power transmission efficiency are tested and analyzed in air and physiological saline. And the influence of port matching efficiency is discussed as well. The results show that the transmission efficiency increases surprisingly in saline. And the transmission efficiency is mainly influenced by the electromagnetic field distribution of the transmitting coil and the area of the receiving coil while the influence of port matching efficiency is weak. At last, three biological compatible packaging methods are discussed and the stability of our PDMS package is tested and analyzed.

Keywords: Implantable devices; Wireless power delivery; MEMS; Inductance coil; Package technology

目 录

第一章 绪论	1
1.1 MEMS 技术	1
1.1.1 MEMS 概述	2
1.1.2 Bio-MEMS	2
1.1.3 RF MEMS	3
1.2 植入式器件供电方式	3
1.2.1 植入式电池	4
1.2.2 无线能量传输	5
1.2.3 其他能量供给方式	5
1.3 本文研究的背景	6
1.3.1 植入式无线能量传输系统研究现状	6
1.3.2 本文研究的方法	7
1.4 本文的内容和构架	8
第二章 无线能量传输原理	10
2.1 电学尺寸及场区的划分	10
2.2 实验系统搭建	11
2.3 适用于无线能量传输的理论模型	12
2.3.1 传统的电磁耦合理论	12
2.3.2 天线的近场辐射模型	14
2.3.3 松耦合模型	15
2.3.4 端口匹配效率	17
2.4 发射与接收线圈的物理模型及特性研究	18
2.4.1 发射和接收线圈的物理模型	18
2.4.2 线圈电阻的计算	23
2.4.3 两线圈之间的互感	26

2.5 本章小结	28
第三章 发射与接收线圈的优化设计与制作	30
3.1 发射线圈的优化设计	30
3.2 发射线圈的制作	33
3.3 接收线圈的优化设计	34
3.3.1 工艺参量对电感性能的影响	34
3.3.2 结构参量对电感性能的影响	35
3.4 MEMS 平面电感的优化参数	37
3.5 MEMS 平面电感及 PCB 电感的制造	37
3.5.1 版图的设计	37
3.5.2 MEMS 电感制作工艺	38
3.5.3 PCB 电感的制作	41
3.5.4 测试分析	42
3.6 本章小结	49
第四章 人体环境的影响	50
4.1 人体介质与空气介质的差异	50
4.1.1 电介质特性	50
4.1.2 趋肤深度	51
4.1.3 介质中的波长	52
4.2 仿真比较考虑人体介质参量后传输性能的变化	54
4.2.1 仿真方式的选择	54
4.2.2 改变介质特性参量结果比较	55
4.3 比吸收率	61
4.3.1 SAR 概述	61
4.3.2 本实验相关 SAR 计算	62
4.4 本章小结	64
第五章 能量传输的实验测试及结果讨论	65
5.1 无线能量传输测试平台的搭建	65

5.2 频率的影响	67
5.3 线圈尺寸影响	69
5.4 两线圈相对位置的影响	70
5.5 端口匹配的影响	73
5.6 生物兼容性封装测试	74
5.6.1 可植入封装简介	74
5.6.2 三种可植入式封装技术的研究	74
5.6.3 稳定性测试	76
5.7 本章小结	80
第六章 工作总结与展望	81
6.1 论文工作总结	81
6.2 展望	82
参考文献	83
攻读硕士学位期间取得的科研成果	88
致谢	89

Table of Contents

Chapter 1: Introduction	1
1.1 MEMS technology.....	1
1.1.1 Overview of MEMS technology.....	2
1.1.2 Bio-MEMS	2
1.1.3 RF MEMS.....	3
1.2 Implantable device power supply	3
1.2.1 Implantable battery	4
1.2.2 Wireless power delivery	5
1.2.3 Other power delivery methods	5
1.3 Background	6
1.3.1 Research status	6
1.3.2 The method of the thesis.....	7
1.4 Content and organizational structure of the thesis.....	8
Chapter 2: Principle of wireless power delivery	10
2.1 Electrical size and division of the field region	10
2.2 The set up of the experimental system	11
2.3 Theoretical models of wireless power delivery	12
2.3.1 Traditional theory of electromagnetic coupling.....	12
2.3.2 Antenna near-field radiation model	14
2.3.3 Poorly coupled model.....	15
2.3.4 Match efficiency	17
2.4 Physical model of transmitting and receiving coil and its characterization.....	18
2.4.1 Physical model of transmitting and receiving coil	18
2.4.2 Calculation of the coil's resistance	23
2.4.3 Mutual inductance between two coils	26
2.5 Summary.....	28

Chapter 3: Optimal design and fabrication of transmitting and receiving coil	30
3.1 Optimal design of the transmitting coil	30
3.2 Fabrication of the transmitting coil	33
3.3 Optimal design of the receiving coil	34
3.3.1 Process parameter influences to the receiving coil.....	34
3.3.2 Structure parameters effects on the receiving coil.....	35
3.4 Parameters of the MEMS planar inductance.....	37
3.5 Fabrication of MEMS and PCB inductance.....	37
3.5.1 Design of MEMS inductance's Layout	37
3.5.2 Fabrication of MEMS inductance.....	38
3.5.3 Fabrication of PCB inductance.....	41
3.5.4 Test and analysis	42
3.6 Summary.....	49
Chapter 4: Environmental impact of human body	50
4.1 Differences in human body and air media.....	50
4.1.1 Dielectric characteristics.....	50
4.1.2 Skin depth.....	51
4.1.3 Wavelength in the media	52
4.2 The Simulation of parameters of human body to the transmission performance.....	54
4.2.1 Simulation method.....	54
4.2.2 The comparison of dielectric characteristics parameters changes.....	55
4.3 Specific Absorption Rate	61
4.3.1 Overview of SAR	61
4.3.2 SAR calculation of this experiment.....	62
4.4 Summary.....	64
Chapter 5: Test and discuss on the power delivery	65

5.1 Testing platform of wireless power delivery	65
5.2 Frequency	67
5.3 Size of coils.....	69
5.4 Relative position of two coils.....	70
5.5 Match efficiency	73
5.6 Biocompatible package testing	74
5.6.1 Overview of biocompatible package	74
5.6.2 Three biocompatible packaging methods	74
5.6.3 Test of package stability	76
5.7 Summary.....	80
Chapter 6: Conclusion and prospect.....	81
6.1 Conclusion	81
6.2 Prospect.....	82
References	83
Publications	88
Acknowledgements	89

第一章 绪论

随着微电子技术, 纳米技术, 及微机械系统 (MEMS) 技术的发展, 越来越多的微纳器件被研发出来, 由于其尺寸小, 重量轻, 能耗小, 灵敏度高等特点, 很快被应用于植入式医疗领域。依靠这些技术的发展, 我们制造出了高智能, 极微小, 可植入的传感器, 可移动的机械及药物释放装置等。这些植入式器件对于体内诊断和干预治疗, 以及提高病人生活质量都是大有裨益的, 最早的, 也是最常见的如心脏起搏器^[1]和人工耳蜗^[2]。目前, 植入式技术正在蓬勃发展, 也展现出一些颇有价值的愿景, 比如说欧盟的 Healthy Aims 项目, 其中包括颅内压力传感器, 视网膜植入, 用于内部诊断和自动给药的片上系统^[3], 以及端接于神经末梢的用于与大脑通讯的端口技术^[4]也正在被研究。

伴随着植入式器件的不断研发和应用, 许多不可避免的关键性问题已经浮现, 制约着植入式器件的研究进程, 同时也对这项新技术提出了挑战^[5]。绝大多数植入式器件, 需要在人体内长时间工作, 以完成对疾病的诊断, 治疗, 及监测, 但由于其植入人体的位置, 以及手术取出将会对病人造成巨大的痛苦和风险, 因此如何为植入式器件长期, 稳定, 高效地供能成为了困扰医生及科研人员必须突破的一个瓶颈^[6]。无线 RF 能量传输, 是一种很好的解决方案, 相对于直接刺破皮肤供电^[7], 及植入式电池供电, 它具有无感染, 无需更换, 无漏电等众多优势。

本章先是对涉及到的 MEMS 相关领域技术进行了介绍, 并对植入式医疗的研究背景做了简要的介绍, 再对研究现状进行了讨论, 最后对我们提出的一种新型的无线 RF 能量传输方法进行了详细介绍。

1.1 MEMS 技术

本小节首先简要介绍了 MEMS 技术的概念, 然后由于我们植入式无线能量传输技术既涉及医疗植入式技术, 又关系到射频无线能量传输技术, 故分别介绍了 Bio-MEMS 和 RF MEMS 这两个与我们研究相关的 MEMS 技术领域两个重要分支的概念及发展应用。

1.1.1 MEMS 概述

微机电系统, Micro Electro Mechanical Systems 简称 MEMS。其英文全称亦是对其主要特点的最好概括: 微型 (Micro) 指的是, 单个典型的 MEMS 器件的特征尺寸通常在 $1\mu\text{m}$ 到 1mm 之间, 微型化带来了谐振频率提高, 重力影响减小, 热惯性低等优点, 但随之而来的, 器件的某些特性可能会远不及宏观时显著, 亦有微观时某些宏观可以忽略的物理效应变得明显^[8,9]。机电 (Electro Mechanical) 表示部件具有电子或机械运动特性。当然现如今 MEMS 的概念在不断地扩展, 其微型实体也包括热、磁、光学、流体元件和系统, 这些元件中也很多没有运动部件^[10-12]。系统 (Systems) 表示, 大多数成功的 MEMS 通常并不是单个的微型化组件, 而是多个不同功能组件的集成。其功能包括信号感知采集和处理、命令执行或控制, 对应的器件为传感器和执行器^[13-16]。

MEMS 的制造技术源于集成电路 (IC) 制造工艺, 其中不论是工艺上还是衬底材料的选择上都有很多能够与 IC 兼容, 便于使用 IC 技术制造 MEMS 器件所需的信号处理和控制电路, 但由于一些特殊的应用形成了许多 MEMS 制造所特有的工艺^[17-19]。MEMS 的制造技术主要包括: 光刻、外延、薄膜淀积、氧化、扩散、注入、溅射、蒸镀、刻蚀、划片和封装等。

1.1.2 Bio-MEMS

由于 MEMS 器件具有微型化, 高集成度, 便携式, 高灵敏度等特点, 很适用于生物学方面的应用, 能够快速、自动、高通量、较小损伤地完成生物医学的诊断和治疗, 其批量生产能力更是极大地降低了生物医学诊断和治疗的成本, 因此 Bio-MEMS 这门微机电与生物医学的交叉学科便应运而生。

Bio-MEMS 的相关研究和应用主要包括生物学研究、医疗诊断和临床介入等方面。其研究的主要内容包括: 生物体外生物医学微型诊断系统和生物体内的诊断, 监测及治疗系统。体外 Bio-MEMS 研究的是在生物体外对生物体进行诊断和治疗的微型系统, 其主要包括微型集成的生物, 电子或传感器芯片^[20]。而体内 Bio-MEMS 研究主要包括, 植入式医疗系统^[21-24], 自动给药系统^[25,26], 微型人造器官^[27-31], 精密外科工具^[32,33], 微型成像系统^[34]等。这些微型系统中融入了许多关键的 MEMS 技术, 如微传感器, 微执行器, 微泵, 微阀, 微针, 生物电

子芯片等^[20,35,36]。各种适用于制作植入式器件及封装的生物兼容性医用金属，半导体，高分子聚合物的材料及表面处理方法被研究使用。

1.1.3 RF MEMS

随着信息时代的来临，在民用及军用的无线通讯领域，对射频和微波电路中的信号收发及处理要求不断提高，迫切需要一些低功耗、超小型化且能与信号处理电路集成的平面结构新型器件，如截止频率更高的开关，带宽更小的滤波器，更高 Q 值的谐振器或电感器等等^[37-39]。但是，目前射频通讯系统中仍有大量不可或缺的无源元件以分立形式存在，很难集成到有源电路芯片上，在 Q 值、隔离度、插入损耗等方面的性能也有待提高。这些依靠传统技术手段的元件，也成为限制系统尺寸进一步缩小的瓶颈^[40]。而 RF MEMS 技术的出现有望解决这些难题，并实现和 MMIC 的高度集成，使制作集信息的采集、处理、传输、处理和执行于一体的高集成度，低寄生损耗，低耦合的系统集成芯片（SOC）成为可能^[37,40]。因此，自从二十世纪 80 年代开始研制出第一个低频的 MEMS 开关以来^[37]，每年对 RF MEMS 的研究投入呈现惊人的增加，并产生许多对目前通讯系统中射频结构产生重大影响的技术。

目前，RF MEMS 的研究主要应用于以下四个不同的领域：（1）RF MEMS 开关、变容器和电感器；（2）微加工传输线、高 Q 谐振器、滤波器和天线；（3）FBAR（薄膜体声谐振器）和滤波器；（4）RF 微机械谐振器和滤波器。

1.2 植入式器件供电方式

近年来，植入式医疗技术得到了长足的发展。从较早出现，现今仍广泛使用的心脏起搏器，人工耳蜗，到现今如今的植入式药泵^[25,26]，治疗癫痫病的迷走神经刺激器，治疗帕金森的深脑刺激器^[41]，治疗截瘫的肌肉刺激器^[42]，等等。对于某些特殊病患，植入式医疗技术已经成为首选^[43]。

对于大多数植入人体的用于监测或治疗的器件，都要求其能够高效、稳定、长期地在人体内工作，这同时也要求要有高效、稳定的能量供给功能单元。又由于植入式器件植入人体的位置，不仅限制了器件的大小，重量，和耗能，同时使得对这些供电电源提出了特殊的要求。例如，小型化，长效性，电量自释放速

度低，密封性好，生物兼容性好等^[44]。其中，电源的长期性和稳定性最为重要。

由于不同的植入式器件对电能的消耗不同，因此了解各种植入式器件对电能的需求等级，可以更有针对性地更有效的选择适合的电能供给方式，下面表 1-1 给出了几种常见的植入式器件对消耗功率的要求^[44]，为了延长器件的使用寿命（一般为数年），减少人体器官吸收电磁辐射功率，我们使用的器件电能消耗多为毫瓦级。

表 1-1: 常见的几种植入式器件的能耗

植入式器件	典型的消耗功率
心脏起搏器、除颤器	30 ~ 100 μ W
药物微泵	2mW
神经刺激器	30 μ W ~ 10mW
胶囊式诊疗器	50mW
人工耳蜗	100mW
人工心脏	12 ~ 45W

植入式器件供能的方式很多，最早的有为临床人工心脏 Cardiowest 设计的导线直接刺破皮肤进行供电，这种方式虽然简单易行，但是将电源装置安置在病人体外，通过导线连接体内人工心脏，不仅给病人带来了痛苦与负担，同时开放的外露的创口，也极易感染。于是，现在研究的热点主要集中在研究超大容量的植入式电池，安全高效的无线能量传输以及利用人体自身环境条件供电等几种供电方式上^[45]。

1.2.1 植入式电池

运用植入式电池的最重要原因是因为它的高可靠性。内部电池供电最早出现在低功耗，或者极少出现高功耗使用情况的植入式医疗电子设备中。20 世纪 70 年代中期成功研制了锂电池，这种电池以其具有高能量密度，高可靠性，自放电

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库